

基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展

王卫军¹, 范磊¹, 赵志强², 韩森¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要:随着煤层开采深度的不断增加, 深部巷道围岩稳定性控制已成为采矿领域的重大难题之一, 深部巷道围岩控制效果直接关系到煤矿井下的安全生产和人员健康。巷道开挖后, 塑性区的出现是影响巷道围岩稳定的主要原因。从塑性区形成与扩展的视角出发, 在整理和归纳现有巷道破坏机理和围岩塑性区理论等成果的基础上, 探讨了巷道破坏模式与围岩塑性区分布的内在关系, 认为巷道围岩控制从本质上来说就是控制围岩塑性区形成与扩展的过程。围岩塑性区扩展的时效特性以及锚杆支护对围岩塑性区的控制作用, 成为科学有效控制巷道围岩的重要理论依据, 并基于此提出巷道围岩稳定性的控制理论与技术。结果显示, 塑性区是巷道开挖的产物, 围岩塑性区的形成与扩展是矿山压力作用的结果, 对于深部巷道, 围岩塑性区的出现是必然的。科学控制塑性区需要全面认识塑性区在巷道围岩中所起的作用, 既要让围岩通过塑性破坏释放体内能量, 又要防止塑性区的无序扩展。因此, 在巷道围岩控制过程中应以充分发挥围岩自承能力为主, 支护干预为辅。深部巷道围岩塑性区的控制具有全局性和过程性, 将对巷道全周期内围岩塑性区的控制划分为3个阶段, 通过调控塑性区形态、抑制塑性区扩展, 实现深部巷道围岩的稳定控制。

关键词:塑性区; 巷道围岩控制; 形成与扩展; 破坏模式; 支护机理

中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0320-17

Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control

WANG Weijun¹, FAN Lei¹, ZHAO Zhiqiang², HAN Sen¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing depth of coal mining, the stability control of surrounding rock in deep roadway has become one of major problems in the mining field, and the effect of surrounding rock control in deep roadway is directly related to the safe production and health of personnel in underground coal mines. The emergence of plastic zone after roadway excavation is the main reason for the stability of the surrounding rock of the roadway. From the perspective of the formation and expansion of the plastic zone, this paper discusses the intrinsic relationship between the roadway damage mode and the distribution of the plastic zone of surrounding rock on the basis of the results from collating and summarizing the existing roadway damage theory and the theory of the plastic zone of surrounding rock. It is believed that the control of the sur-

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2023-12-27 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1412

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374088, 52074115)

作者简介: 王卫军 (1965—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wjwang@hnust.edu.cn

通讯作者: 范磊 (1995—), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生。E-mail: fanlei@mail.hnust.edu.cn

引用格式: 王卫军, 范磊, 赵志强, 等. 基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 320-336.

WANG Weijun, FAN Lei, ZHAO Zhiqiang, et al. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 320-336.



移动阅读

rounding rock of roadway is essentially the process of controlling the formation and expansion of the plastic zone of surrounding rock. The expansion of the plastic zone of surrounding rock and the control effect of anchor support on the plastic zone of surrounding rock have become an important theoretical basis for the scientific and effective control of surrounding rock in roadway, and based on this, the authors propose the theory and technology for the stability control of surrounding rock in roadway. The results show that the plastic zone is the product of roadway excavation, and the formation and expansion of the plastic zone of surrounding rock is the result of mine pressure. For deep roadways, the appearance of the plastic zone of surrounding rock is inevitable. Scientific control of plastic zone requires a comprehensive understanding of the role played by the plastic zone in roadway surrounding rock. It is necessary to allow the surrounding rock to release the energy in the rock body through plastic failure, but also to prevent the disorderly expansion of the plastic zone. Therefore, in the process of controlling the surrounding rock of roadway, the self-bearing capacity of the surrounding rock should be given a full play as the main focus, and the support intervention should be supplemented. The control of plastic zone of surrounding rock in deep roadway is global and procedural. The control of the plastic zone of the surrounding rock in the whole life of roadway is divided into three stages. By regulating the shape of the plastic zone and inhibiting the expansion of the plastic zone, the stability control of the surrounding rock of deep roadway is realized.

Key words: plastic zone; surrounding rock control of roadway; formation and expansion; damage mode; supporting mechanism

随着采矿活动向地层深部不断发展,深部巷道围岩稳定性控制已成为国内外煤矿企业和学者所面临的重大难题之一。通常,煤矿巷道围岩破坏模式主要有顶板离层或冒顶、片帮、底臃以及冲击地压等几种基本类型,这些破坏模式所发生的应力环境有较大的差别,影响因素众多。因此,人们针对不同的应力环境采用了不同的理论模型、力学机制来阐述其破坏机理。例如马念杰等^[1-2]基于蝶形塑性区的旋转特性,揭示了深部采动巷道蝶叶型冒顶的发生机理。姜耀东等^[3]基于现场观测和物理相似模拟试验等方法,将常见底臃划分为挤压流动性、挠曲褶皱性、剪切错动性和遇水膨胀性4种,并分别给出了不同情形下的底臃机理。赵洪宝等^[4]基于滑移线场理论,提出了巷道非对称型底臃的形成机理。潘俊锋等^[5]基于时变特性,揭示了煤层巷道冲击地压的发生机理。国内外许多学者对巷道破坏机理的研究考虑了围岩的力学性质、应力场的分布与演化以及支护与围岩的作用关系等,应该说,已取得了重要的研究成果。但到目前为止,各种理论之间很难进行统一,缺乏普遍意义。往往针对同一巷道破坏模式,从多个研究角度产生了多种破坏机理,这些破坏机理在一定程度上可以相互补充,但仍无法形成统一的破坏理论。此外,在实际工程中,巷道破坏往往都是多种模式的合成,单独的破坏模式并不容易出现。因此,现阶段仍缺乏能够统一解释这些破坏模式以及模式之间演化关系的理论,这就给围岩的系统控制带来了诸多困难。

从巷道破坏模式的形成过程来看,巷道的破坏模

式是围岩应力作用的外在表现,围岩的应力环境是巷道破坏模式形成的本质原因。但是,围岩的应力环境具有复杂性、特殊性和多变性,很难将各式各样的应力环境全部统一到一个共同的力学模型。这也是众多学者通常选择某一特定应力环境建立相应力学模型,进而揭示该应力环境下巷道破坏机理的原因。然而,岩石是弹塑性材料,完整岩体在由弹性状态向破坏状态转变的过程中,总会经历塑性屈服阶段。虽然塑性屈服并不能与围岩体的破坏直接等价,但是屈服后的塑性岩体在高应力的作用下继续变形,从而引起结构面离层、滑动、裂隙张开及新裂纹产生,是导致巷道剧烈变形和破坏的直接原因。因此,塑性状态是联系岩体应力环境和破坏模式的中间状态,塑性区的形成和扩展,在一定程度上能较为灵敏地反应和解释巷道最终的破坏形态。

虽然,有关巷道破坏机理的理论众多,但各种理论的共同性在于都认为巷道破坏从本质上来说是围岩体在一定地质环境(温度、湿度等)和应力环境下的力学特征。因此,从围岩的岩层构造、岩体的力学性质、所处的应力环境出发来研究巷道的破坏机理是科学且合理的。此外,现有的破坏理论绝大多数都与围岩的弹塑性状态或者塑性区的分布特征有关,这也为笔者尝试从塑性区形成与扩展的角度研究巷道差异化破坏模式及其成因提供了可能。

因此,笔者在充分学习和借鉴已有研究成果的基础上,通过理论创新、实验研究、现场监测等手段,进一步认清深部巷道围岩破坏模式与塑性区的形成、扩

展和演变的因果关系,从塑性区形成与扩展的角度形成统一的巷道围岩破坏理论,为全面解决深部巷道的支护问题进一步夯实理论基础。

1 巷道围岩破坏机理研究成果

国内外学者关于巷道围岩破坏机理开展了深入研究,通过理论研究、数值模拟、室内实验和现场试验等方法提出了多种多样的破坏机理,这些机理通常可分为四大类:应力主导型、围岩性质主导型、围岩结构主导型和综合因素影响型。

1.1 应力主导型

围岩应力主导型的破坏机理是从巷道所处的应力环境出发,认为围岩应力场的分布与演化是巷道围岩破坏的本质原因。

例如于学敏等^[6]于1981年提出了“轴变论”,提出通过改变巷道轴比,使围岩应力均匀分布,保证巷道围岩稳定。前苏联学者提出了应力控制理论^[7-8],认为巷道围岩的变形破坏源于开挖后围岩体应力分布的改变,提出通过改善围岩应力环境提高巷道围岩的稳定性。GALE W J^[9]提出了最大水平应力理论,认为巷道围岩稳定性受矿井最大水平应力与巷道布置方向的影响,与最大水平应力平行的巷道受水平应力影响最小,顶底板稳定性最好。1981年钱鸣高院士^[10]提出“砌体梁”平衡理论,认为采空区侧向支撑压力会对巷道围岩稳定产生一定影响,提出通过留设大煤柱平衡顶板压力,将下区段平巷布置在远离采空区的原岩应力区。1979年宋振骐院士^[11]提出“传递岩梁”理论,提出通过留设窄小煤柱隔断采空区,并将下区段平巷布置在内应力场的低应力区,达到保证巷道稳定的目的。何满潮院士^[12-13]提出了基于“切顶短臂梁”理论的无煤柱自成巷开采方法。左建平^[14-15]提出了梯度应力场的概念,揭示了巷道围岩梯度破坏机理,并建立了巷道等强支护理论模型。肖同强^[16]发现埋深和构造应力越大,顶煤横向弯曲变形、沿水平层理的滑移错动及其剪切破坏特征越明显,揭示了构造应力对厚顶煤巷道变形破坏的作用机理。齐庆新等^[17]提出了以单位应力梯度为表征的冲击地压应力控制理论,揭示了构造应力和采动应力对冲击地压发生诱发机制。

1.2 围岩性质主导型

围岩性质主导型的破坏机理是从巷道围岩的力学特性出发,认为岩层差异化分布、岩体力学强度以及岩体物理化学性质等是导致巷道围岩变形破坏的主要原因,尤其是软岩本身所具有的大变形力学特性

为该类巷道围岩破坏机理的提出和发展提供了重要支撑。

例如何满潮院士^[18]将软岩的变形力学机制归纳为物化膨胀、应力扩容和结构变形3类,提出根据软岩变形力学机制的不同差异化设计巷道围岩的控制方案。侯朝炯、勾攀峰等^[19-20]基于物理模拟试验研究,提出了围岩强度强化理论,认为通过改善锚固区围岩的力学参数和力学性能,增强锚固区围岩的承载能力,能够有效提高巷道的稳定性。李军等^[21]研究并揭示了强膨胀弱胶结软岩巷道的变形破坏机理。李桂臣等^[22-23]研究了软弱夹层的物理化学和工程力学特性,揭示了软弱夹层顶板巷道围岩破坏机理,并提出了软弱夹层顶板巷道安全因子的概念。孟庆彬等^[24]发现深部高应力作用、地下水的物化作用和力学作用、高地温的影响都会使软岩的力学性质发生巨大改变,并提出了深部高应力软岩巷道的变形破坏机理。

1.3 围岩结构主导型

国内外学者在研究围岩自承载能力的过程中发现巷道围岩体中存在着“拱效应”,认为“拱结构”是围岩自承载作用的重要角色,而“拱结构”的破坏是导致巷道大变形失稳的主要原因,从而形成了围岩结构主导型的巷道围岩破坏机理。

例如以泰沙基^[25]和普罗托吉雅可诺夫^[26]为代表的学者认为巷道顶部垮落到一定程度后,会自然形成一个拱形结构,这就是经典的普氏冒落拱理论。方祖烈^[27]根据巷道周边围岩的变形破坏特征,提出了“主次承载区”的概念。康红普^[28-29]将在巷道围岩中起主要承载作用的圈状区域岩体称为“关键承载圈”。王卫军、李树清^[30-31]基于弹塑性理论分析、数值模拟和现场试验研究,提出了“内-外承载结构”理论。李新元^[32]、梁晓丹^[33]、王迎超^[34]、杜晓丽^[35]和王晓卿^[36]等认为巷道围岩中存在压力拱效应,但采用了不同的压力拱划分依据,研究了压力拱的分布形态及其演化特征。黄庆享等^[37]基于普氏理论,在考虑“顶板-两帮-底板”相互影响的基础上提出了巷道围岩自稳平衡圈理论,认为支护的目的是为了控制自稳平衡圈内岩体的稳定,并提出了“治顶先治帮,治帮先治底”的巷道支护理念。谢生荣等^[38-39]认为巷道围岩在注浆加固后会存在着由密集高强锚杆构成的承压拱、由厚层钢筋网形成的喷层拱以及由滞后注浆形成的加固拱等多种“拱结构”,并阐明了成拱及强化支护的机理。彭瑞等^[40-41]根据不同的应力划分依据,提出了“强-弱-关键”耦合支承层和抗剪承载结构等巷道围岩结构

概念。

1.4 综合因素影响型

综合因素影响型的破坏机理认为在实际工程中围岩的破坏通常不是由单独因素直接导致, 而是由 2 种及以上影响因素的综合作用。该类巷道破坏机理因考虑的影响因素更多, 适用的工程条件更广, 也更容易被人们所接受, 因此, 在现场工程中得到了广泛应用。

例如康红普院士^[42-43]认为深部动压巷道围岩大变形是围岩物性劣化、偏应力诱导围岩扩容、软岩结构性流变及超长工作面采动影响等多个方面的综合结果, 并以此为基础, 提出了千米深井、软岩、强采动巷道“支护-改性-卸压”协同控制理念。袁亮院士^[44]提出了基于“应力恢复、围岩增强、固结修复、转移扩大”的深部岩巷围岩稳定控制理论, 并提出了深部岩巷围岩稳定控制的技术措施体系。牛双建等^[45]结合现场松动圈测试结果, 提出在深部极软岩巷道初期采用主动柔性支护对破碎围岩力学性能“固”、中期预留变形量对高应力“卸”、后期采用全断面高强度和高刚度支护对其流变变形强“抗”的刚柔耦合动态加固技术。杨仁树等^[46]研究了复杂岩层大断面硐室群围岩的变形破坏特征, 认为围岩剪应力集中、岩体力学强度低且水化作用明显是导致复杂岩层大断面硐室群围岩破坏的主要原因, 并提出了“强柱固底”的加固支护方案。王猛等^[47]研究了深部采动巷道围岩的变形破坏特征, 提出适度让压释放高应力, 加固围岩提升围岩承载能力的围岩控制方法。

2 围岩塑性区理论研究成果

2.1 塑性区边界的求解

目前, 关于巷道围岩塑性区解析解的研究中, 绝大多数以均匀应力场为前提条件, 但事实上, 巷道围岩应力场极少能够达到静水压力状态。因此, 巷道侧压系数不为 1 的情况应该得到格外关注。现阶段, 关于非等压巷道围岩塑性区应力和弹塑性区边界至今仍未有严格的解析解, 只能求得近似解答。

近似隐式法最早在 KASTNER^[48]的著作《隧道与坑道静力学》中就已提及, 之后唐芙蓉^[49]、赵志强^[50]、韩森^[51]等采用 M-C 准则, 李涛^[52]、彭瑞^[53]等采用 D-P 准则, 陈立伟^[54]、刘波^[55]等采用统一强度准则, 张小波等^[56]采用 H-B 准则, 在考虑中间主应力、渗流、扰动以及剪胀等不同因素影响的情况下, 采用近似隐式法对非等压巷道围岩塑性区的分布规律展开了大量研究。小参数解法常用于侧压系数与 1 相差不大的

双向非等压巷道围岩塑性区的求解, 例如鲁宾涅依特^[57]、蔡美峰^[58]、陈启美^[59]、侯公羽^[60]等采用小参数解法对双向不等压圆形硐室进行研究, 得到了围岩弹塑性应力和弹塑性边界线方程。魏悦广等^[61]沿用小参数解法, 给出了基于 M-C 准则的椭圆形巷道围岩弹塑性应力场的近似解。复变函数法是以复变函数理论为基础, 将确定弹塑性区的交界问题转化为映射函数系数的求解问题。GALIN L A^[62]基于理想弹塑性模型, 采用复变函数法获得了 Tresca 强度准则下非轴对称弹塑性问题的解析解。之后, OCHENSBERGER 等^[63]对 Galin 解进行了修正。DETOURNAY E^[64]、吕爱钟等^[65]将非轴对称弹塑性问题的复变函数解答推广到 M-C 准则。随着对非等压巷道围岩弹塑性力学的研究不断深入, 越来越多的学者在求解过程中考虑了其他因素的影响, 非等压巷道围岩塑性区的边界解答不断完善^[66]。其中, 由近似隐式解法求解的圆巷围岩塑性区具有圆形、椭圆形及蝶形 3 种基本形状, 这与大量数值模拟的结果相仿, 且求解过程并不复杂, 成为现阶段求解双向非等压圆巷围岩塑性区边界的主要方法之一。

式 (1) 为 2014 年赵志强^[50]基于 M-C 准则推导的双向非等压圆巷围岩塑性区边界的隐式方程:

$$A_1\left(\frac{a}{r}\right)^8 + A_2\left(\frac{a}{r}\right)^6 + A_3\left(\frac{a}{r}\right)^4 + A_4\left(\frac{a}{r}\right)^2 + A_5 = 0 \quad (1)$$

式中, $A_1 = 9(1-\eta)^2$ 、 $A_2 = -12(1-\eta)^2 + 6(1-\eta)^2 \cos 2\theta$ 、 $A_3 = 10(1-\eta)^2 \cos^2 2\theta - 4(1-\eta)^2 \sin^2 \varphi \cos^2 2\theta - 2(1-\eta)^2 \times \sin^2 2\theta - 4(1-\eta^2) \cos 2\theta + (1+\eta)^2$ 、 $A_4 = -4(1-\eta)^2 \cos 4\theta + 2(1-\eta^2) \cos 2\theta - 4(1-\eta^2) \sin^2 \varphi \cos 2\theta - \frac{4C(1-\eta) \sin 2\varphi \cos 2\theta}{P_3}$ 、 $A_5 = (1-\eta)^2 - \sin^2 \varphi \left(1 + \eta + \frac{2C \cos \varphi}{P_3 \sin \varphi}\right)^2$; P_1 、 P_3 分别为巷道水平主应力和垂直主应力, 且有侧压系数 $\eta = P_1/P_3$; a 为巷道半径; C 、 φ 分别为岩石的黏聚力和内摩擦角; r 、 θ 分别为极坐标系下任一点到坐标原点的距离和夹角。

2.2 塑性区基本形态及力学特征

赵志强^[67]根据非等压圆巷围岩塑性区边界的隐式方程式, 通过 Matlab 获得了不同侧压系数下圆形巷道围岩塑性区的分布形态, 同时结合数值模拟的计算结果, 认为巷道开挖后围岩塑性区具有圆形、椭圆形和蝶形 3 种基本形态。

文献^[68-69]提出了判定非均匀应力场中圆形巷道围岩塑性区形态的形态系数 τ , 推导出了形态系数的理论公式, 建立了非均匀应力场中圆形巷道围岩塑

性区形态判定准则,在理论上界定了圆形巷道围岩塑性区圆形、椭圆形和蝶形 3 种形态 (图 1)。

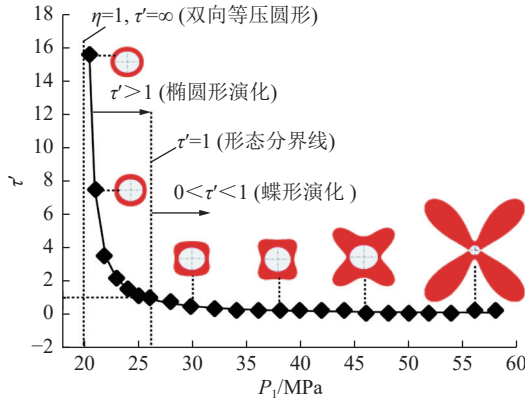


图 1 巷道水平 (最大) 主应力与形态系数间的关系^[69]

Fig.1 Relationship between horizontal (maximum) principal stresses and form factors of the roadway^[69]

式 (2)、(3) 为塑性区形态系数判别公式:

$$\tau' = \frac{m_2}{2m_1} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau' = \infty & (\text{圆形}) \\ \tau' \geq 1 \text{ 或 } \tau' \leq 0 & (\text{椭圆形}) \\ 0 < \tau' < 1 & (\text{蝶形}) \end{cases} \quad (3)$$

式 中 , $m_1 = [12(1-\eta)^2 - 4(1-\eta)^2 \sin^2 \varphi]^2 - 8(1-\eta)^2 \times \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \right); m_2 = 6(1-\eta^2)^3 - 4(1-\eta^2)^2 + \left[2(1-\eta^2) - 4(1-\eta^2) \sin^2 \varphi - \frac{4C(1-\eta) \sin 2\varphi}{P_3} \right] \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \right);$

$$a_1 = \frac{6(\eta-1)}{1-\sin \varphi}; b_1 = (1+\eta) - \frac{(3\eta-5)(1+\sin \varphi)}{1-\sin \varphi}; c_1 = 2\eta - \frac{4C \cos \varphi}{P_3(1-\sin \varphi)} - \frac{2(1+\sin \varphi)}{1-\sin \varphi}.$$

与蝶形塑性区相比,圆形或椭圆形塑性区的形态特征要简单很多。文献[50, 70]通过理论分析和数值模拟发现,围岩蝶形塑性区的形成具有明显的方向特性,蝶叶总是出现在由最大主应力和最小主应力所形成夹角的等分线附近,且随着主应力方向的旋转,蝶形塑性区也会发生旋转。受地质、构造等因素的影响,塑性区很难呈标准形态分布,而是会在 3 种基本形态的基础上发生一定程度的形态变异,该特性在蝶形塑性区中体现得更为明显。文献[50, 71]通过数值模拟发现巷道围岩蝶形塑性区的形态具有变异性,当围岩强度较高时,塑性区蝶叶会发生减小甚至消失,而当围岩强度较低时,塑性区蝶叶能得到充分扩展。文献[72]分析了巷道围岩塑性区最大半径与双向主应力

比值的的关系,发现蝶形塑性区具有突变性和应力敏感性。当围岩处于某一特定的应力环境时,仅需要微小的应力增量,蝶形塑性区的蝶叶便会急剧扩展。而圆形或椭圆形塑性区对应力的敏感性较差,在区域应力场应力逐渐增长的过程中不会发生形态突变现象。

3 巷道破坏模式与围岩塑性区分布的关系

根据变形破坏过程的差异性可将巷道的破坏模式分为“稳定型”破坏、“渐进型”破坏和“突变型”破坏三大类。

3.1 “稳定型”破坏模式

“稳定型”破坏模式是指巷道在开挖后围岩的变形破坏不会一直持续,当围岩体内的弹性势能通过变形得到充分释放后,巷道最终趋于稳定。“稳定型”破坏模式通常出现在塑性区呈圆形或椭圆形分布的巷道中,或因受到岩层分布、地质构造、巷道断面形态以及支护方式等其他因素的影响,塑性区最终形态是在圆形或椭圆形塑性区的基础上发展而来的巷道中。此外,由于巷道出现标准圆形或椭圆形塑性区的条件较为苛刻,在实际工程中,“稳定型”破坏模式的巷道以变异的圆形或椭圆形塑性区为主,由于应力环境未发生本质改变,圆形或椭圆形塑性区在外来因素的综合影响下即使发生一定程度的形态变异,但其形态稳定性(扩展速率)仍较蝶形塑性区明显更好。

3.2 “渐进型”破坏模式

“渐进型”破坏模式是指巷道在开挖以后,即使采取相应的支护措施,但围岩的变形和破坏仍无法得到有效遏制,出现了二次破坏或者反复破坏的现象,这种破坏模式也是国内深部动压巷道围岩破坏的普遍现状。通常,根据诱因的不同可将巷道“渐进型”破坏模式再细分为采动作用下的巷道“渐进型”破坏和岩体蠕变作用下的巷道“渐进型”破坏 2 种。

(1) 采动作用下的巷道“渐进型”破坏。

受采动影响后,巷道围岩塑性区的范围可能会发生一定程度的扩展。然而研究表明,不同形态的塑性区对于应力的敏感性差异较大。通常,圆形或椭圆形塑性区抵抗外力扰动的能力较蝶形塑性区更强,受扰动后塑性区的扩展速率并不高,支护结构对扰动后的塑性区岩体仍有较好的支护作用,如图 2 所示。但是,蝶形塑性区对外力扰动极其敏感,极易发生恶性扩展。因此,出现蝶形破坏的巷道,即使得到有效支护,而在采动作用下发生塑性区二次扩展的概率仍然较高,且塑性区范围的扩展速率较快,从而导致巷道破坏程度进一步加剧,更容易出现“渐进型”破坏 (图 3)。

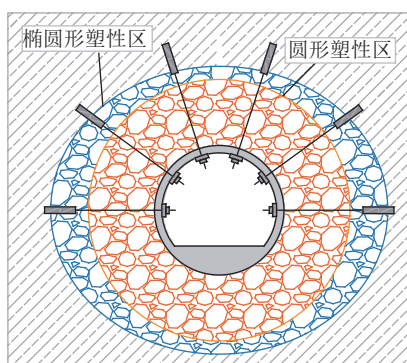


图2 “稳定型”破坏模式下围岩塑性区分布

Fig.2 Distribution of plastic zone of surrounding rock under “stable” failure mode

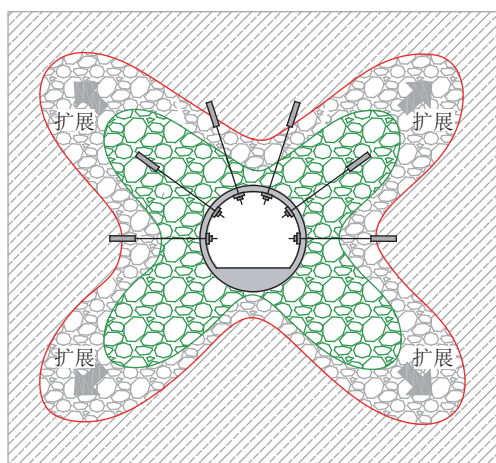


图3 外力扰动下的巷道“渐进型”破坏

Fig.3 “Progressive” failure of roadway under external force disturbance

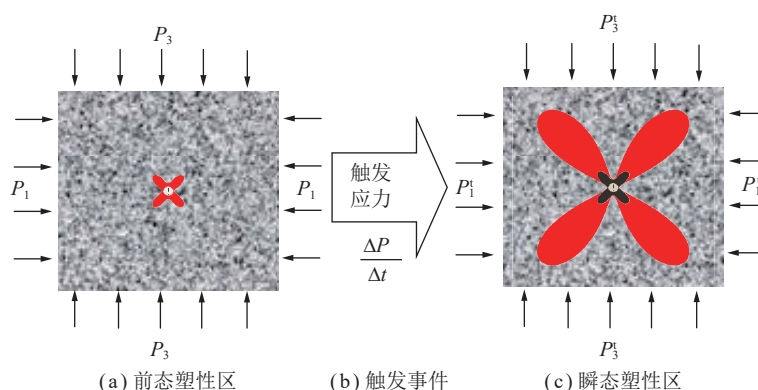
(2) 岩体蠕变作用下的巷道“渐进型”破坏。

在高应力的作用下塑性区围岩会表现出明显的蠕变特性,且岩体的蠕变特性受应力水平、岩石种类以及力学状态等因素的共同影响。部分巷道的围岩条件、应力环境较好,且及时实施了有效的支护措施,围岩的蠕变行为能够在较短时间内趋于稳定。但是部分巷道的围岩强度较低、应力水平较高,例如深部软岩巷道,其围岩在服务期内的变形量和变形速率随着时间的增加不断增大,最终出现了非稳定蠕变。研究发现^[73],软岩巷道的蠕变主要源于塑性区峰后岩体的蠕变。因此,巷道开挖后,由于围岩体的非稳定蠕变将会导致两方面不利影响:①原本处于弹性状态的部分围岩体进入塑性阶段,巷道围岩塑性区的范围进一步扩展;②围岩体尤其是塑性区岩体向巷道空间持续变形,最终导致巷道围岩大变形、失稳现象的发生。因此,在高应力作用下的围岩蠕变行为,尤其是塑性区峰后岩体的非稳定蠕变行为,会导致巷道出现“渐进型”破坏。

3.3 “突变型”破坏模式

(1) 蝶型破坏引发的巷道冲击地压。

蝶形是围岩塑性区的非稳定形态^[74],当达到某一临界条件时,仅需要较小的应力增量,蝶形塑性区便会发生恶性扩展,并伴随能量的急剧释放。当短时间内塑性区范围的增量足够大时,浅部围岩体已经无法承受聚集的巨大能量,则会将破碎岩体向巷道空间弹射,形成冲击地压灾害(图4, P_1 、 P_3 分别为瞬态应力场中巷道水平主应力和垂直主应力)。

图4 巷道蝶形冲击地压发生机理^[74]Fig.4 Butterfly rock burst mechanism in roadway^[74]

(2) 蝶型破坏引发的巷道煤与瓦斯突出。

煤与瓦斯突出也是巷道破坏的主要模式之一,是矿井自然灾害的重要角色。长期以来,众多学者针对煤与瓦斯突出机理,提出了多种假说,一般可归纳为瓦斯作用假说、地应力作用假说、化学本质假说以及

综合作用假说四大类。其中,掘进巷道蝶型突出机理认为^[72],掘进巷道煤与瓦斯突出的力学本质是在巷道掘进工作面前方极短时间内出现一定程度的蝶型塑性区增量,引发围岩内弹性能与瓦斯能的叠加并迅速释放,从而诱发煤与瓦斯突出。掘进工作面前方煤岩

体塑性区在短时间内的增量决定了煤与瓦斯突出危险性的。

4 锚杆支护对围岩塑性区的作用机理

一般来说,通过对开挖后的围岩体施加锚杆锚索,挂网喷浆,可以防止或减少巷道的破坏失稳^[75]。然而锚杆支护能否有效控制塑性区的扩展,对塑性区的控制作用如何发挥,对塑性区的控制作用到底有多大等支护机理仍待明确。笔者通过对国内外现有研究成果进行整理和总结,认为锚杆支护对巷道围岩塑性区的作用机理主要体现在2个方面。

4.1 塑性区内岩体非连续变形控制

文献^[76-77]认为锚杆的本质作用是控制围岩的不连续、不协调扩容变形,而对于岩体连续性变形的控制作用十分有限。之后,笔者团队通过开展锚固岩体的力学试验,对比了锚固完整岩体和锚固破碎岩体的力学特征,对前人的结论进行了验证。研究发现,施加一定数量锚杆后,无论是完整试件还是预裂试件,其峰值强度均得到一定程度提高。但是,施加相同数量的锚杆后,预裂试件峰值强度的提高较完整试件更为明显。

图5为完整试件在施加一定数量锚杆后,在加载过程中试件与锚杆应变的变化情况。

结果显示,对完整试件施加锚杆后进行轴向加载,试件应变在加载后的很短时间内迅速增加,试件发生持续变形。而锚杆应变在轴向加载前期增长极为缓慢,锚杆几乎没有发生变形,而是在经过一段时间后,锚杆应变才开始缓慢增加。这是因为,岩石试件破坏前所允许的弹性变形量通常较小,而锚杆是金属材质,与脆性岩石相比,锚杆所能允许的变形就大得多。正是因为两者在变形特性上差异悬殊,导致试件变形和锚杆承载过程并不同步,而是试件先屈服破坏到一定程度后,锚杆的承载性能才能得到有效发挥。因此,锚杆支护在围岩破坏前的作用并不大,锚杆支护的主要对象是塑性区内岩体离层、滑动、裂隙张开以及新裂纹的产生等非连续变形。

4.2 围岩承载能力提升和塑性区扩展抑制

(1) 减缓围岩自身承载能力的弱化进程。

锚杆与围岩结合,控制围岩体的流变进程。室内流变试验发现^[80],锚杆对岩体的流变行为具有较为明显的控制作用,主要体现在:①加锚岩体的长期强度明显增加,残余承载能力显著提高;②锚杆的介入提升了锚固岩体的蠕变应力阈值,延长蠕变发生的初始时间,从而有效延缓岩体的蠕变进程;③在不同应力

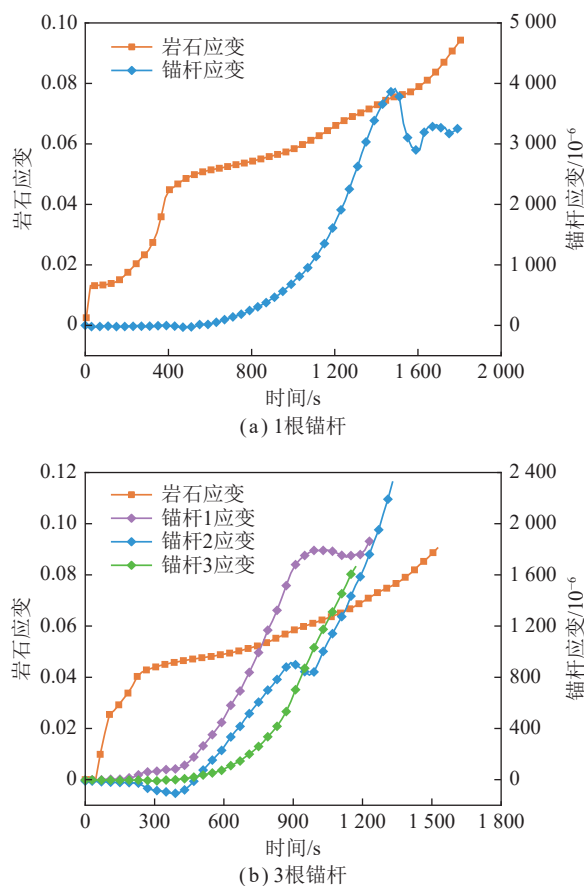


图5 试件与锚杆应变对比^[78-79]

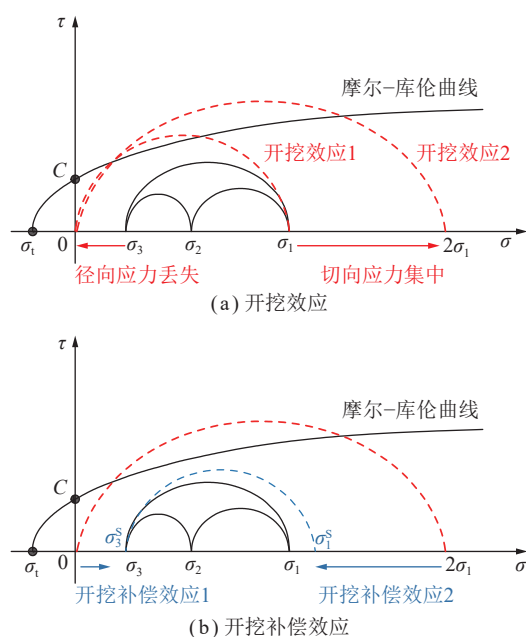
Fig.5 Comparison of strain between specimen and bolt^[78-79]

水平下,加锚岩体的蠕变行为均得到不同程度的减弱,蠕变量减小。

补偿围岩应力,延缓原岩应力的卸载进程。文献^[81-83]认为,巷道围岩的变形破坏源于开挖后径向应力(最小主应力)的不断卸载,而锚杆支护的作用主要是补偿围岩应力,巷道开挖机理如图6所示(图中, C 为黏聚力; τ 为剪应力; σ_t 为抗拉强度; σ 为正应力; σ_1 和 σ_3 分别为围岩的切向应力和径向应力; σ_2 为中间主应力; σ_1^0 和 σ_3^0 分别为开挖补偿后围岩的切向应力和径向应力)。支护所提供的补偿应力越大,补偿时间越短,越能有效延缓由巷道开挖所导致的应力重新分布活动。文献^[77, 84]认为锚杆支护强度与围岩应力场之间差距悬殊,无法改变应力场的分布规律。由锚杆支护所提供的小围压对于围岩峰值强度的提高也并不明显,即对弹性岩体的影响较小。但是却能有效提高了岩体的残余强度,显著增强破碎围岩的自承能力。

(2) 塑性区岩体注浆,提升围岩的承载能力。

注浆锚杆不仅具有普通锚杆的支护性能,通过对岩体孔隙、裂隙中注入高压浆液,还具有堵水、提高围岩强度以及增强围岩承载能力的作用。对具有膨胀性矿物的岩体注入高水材料,能够改善岩体的水理环

图6 开挖补偿机理^[81-82]Fig.6 Excavation compensation mechanism^[81-82]

境,避免或减少岩体遇水膨胀变形和强度软化。此外,浆液固化还能将破碎的岩块重新胶结成整体,提高结构面的黏结力,从而增强围岩体的稳定性。

因此,在围岩体破碎、自身承载能力较低的情况下,及时对塑性区岩体尤其是峰后破碎岩体进行注浆,在锚杆和浆液的共同作用下,围岩的承载能力能够得到有效提升,塑性区的扩展得到一定程度的抑制。

5 巷道围岩塑性区控制理论与技术

5.1 围岩塑性区的控制理论

5.1.1 围岩塑性区的控制依据

基于塑性区的巷道破坏机理认为,围岩的变形破坏与塑性区的形成与扩展以及塑性区内岩体的力学特征密切相关。巷道破坏模式的变化过程也伴随着围岩塑性区的演化。因此,巷道围岩控制从本质上来说就是控制围岩塑性区形成与扩展的过程。

(1) 地应力测试和围岩松动范围的测试,为巷道开展掘前塑性破坏形态和范围预测提供重要技术保障。围岩塑性区的形态是由区域应力场和围岩力学性质共同决定。现阶段,地应力测试技术不断优化,测试精度不断提高,通过布设一定数量的地应力测点就能够较为准确地获取矿区岩层地应力的分布信息。使得在巷道开掘之前就能够掌握围岩的力学性质以及巷道与主应力方向的关系,从而预测巷道开挖后围岩塑性区的分布形态以及巷道的破坏模式,也为科学合理确定巷道位置和延伸方向奠定基础。

(2) 巷道开挖后,围岩塑性区扩展的时效特性为支

护控制塑性区争取了时间。巷道开挖后,围岩的应力平衡状态被打破,应力场重新分布,离巷道表面近的围岩应力传递较快,离巷道表面远的围岩应力传递较慢,但最终会全部进入自然平衡状态^[85]。此外,理论和现场经验表明,巷道的变形不是瞬间形成的,对于不同位置的岩体,力的传递也不是同时发生的,而是由巷道外部岩体到内部岩体再到外部岩体不断影响、循序渐进的过程。在达到自然平衡状态前,围岩应力场一直处于动态调整状态。巷道开挖后围岩应力卸载的时效特性得到了众多学者的认可,这也与实际工程现象高度匹配。此外,围岩的应力环境决定了塑性区的分布规律,因此,巷道开挖后围岩塑性区的最终形态也不是立刻形成的,而是一个不断发展的过程,直到围岩达到平衡状态时,塑性区的最终形态和范围才得以确定。因此,众多学者根据这一特性提出了支护时机的概念^[86-87],也正是由于巷道开挖后围岩塑性区的形成具有时效性,才为通过支护手段控制围岩塑性区提供了可能,争取了时间。

(3) 科学合理的支护方法能够有效控制塑性区的扩展。现阶段,巷道围岩控制最主要的手段就是采用锚杆(索)支护,众多学者针对锚杆支护对围岩塑性区的控制作用展开了研究。研究发现,锚杆支护对于围岩塑性区的控制作用是显而易见的,锚杆支护一方面能够有效控制塑性区内岩体的非连续变形,另一方面通过提升围岩的承载能力,抑制塑性区的扩展。但是,想要充分发挥锚杆的支护作用,在遏制塑性区扩展的基础上控制巷道支护成本,就需要掌握锚杆支护对围岩塑性区的控制机理,把握支护时机,科学合理制定锚杆支护参数。

5.1.2 围岩塑性区的控制理念

(1) 塑性区是巷道开挖的产物,无法从源头上避免塑性区的形成。

巷道开挖过程其实就是围岩应力的卸载过程。在现有巷道开拓和支护水平下,从巷道开挖伊始,到支护完成并提供支护阻力的这一段时间内,由于围岩应力的持续卸载,巷道已经形成了一定形态和范围的塑性区,将该部分塑性区称为“给定塑性区”。因此,“给定塑性区”是在现有巷道开拓和支护水平下,由于巷道开挖过程中,围岩应力不断卸载,但还未及时进行支护干预所形成的塑性区。“给定塑性区”是在支护介入前形成,因此不受支护方式、支护强度的影响。

现阶段,在部分地下工程的开挖时会采用掘锚一体技术,能够不断接近“边开挖边支护”的效果,极大降低围岩应力在支护前的卸载程度,使围岩尽可能保

持原岩应力状态,但仍无法达到绝对的“边开挖边支护”。因此,在现有的技术水平下,巷道围岩“给定塑性区”仍无法被消除。塑性区成为巷道开挖的必然产物,在巷道开挖时杜绝塑性区的出现是无法实现的。

(2) 科学控制塑性区需要全面认识塑性区在巷道围岩中所起的作用。

围岩强度强化理论认为,巷道开挖后,围岩塑性区的形成导致塑性区内大部分岩体的力学强度明显下降。随着塑性区的不断扩展,围岩承载结构的位置向岩体深部不断转移,巷道浅部岩体的承载能力持续下降。浅部塑性岩体因应力卸载程度较高,围岩裂隙发育、贯穿,结构面离层、滑动,在持续高应力的作用下,塑性区发生恶性扩展,塑性区内岩体发生非线性、非协调性剪胀变形,进而导致巷道围岩大变形和失稳等现象的发生。

但是,从巷道开挖后围岩应力分布特征上来看,塑性区的边界通常是围岩应力集中区的中心,塑性区的范围越大,应力集中区的位置也逐步向巷道围岩深部转移,塑性区的出现起到隔绝岩体深部高应力的作用,塑性区内尤其是破碎区岩体受深部高地应力的影响明显降低。此外,巷道开挖后,围岩体内储藏的大量能量需要得到有效释放,尤其是深部高应力巷道。开挖破坏了围岩体的力学平衡,如果围岩体内所积聚的强大能量得不到及时释放,会对巷道的安全和稳定产生巨大影响。此时,塑性区的出现能够大幅度降低围岩体能量,加快巷道开挖后围岩体由非平衡状态向自然平衡状态转化的速率。

(3) 围岩自承为主,支护干预为辅,实现塑性区可控扩展。

针对深部高应力巷道,想控制围岩不变形、不产生塑性区是不现实的,需要允许巷道在一定程度上发生变形和塑性破坏,释放岩体内的能量,但又不能允许围岩无休止的变形。塑性区无休止的扩展,会使围岩承载能力不断丧失,导致巷道围岩大变形和失稳。因此,深部高应力巷道的围岩控制应当充分发挥围岩的自承能力,辅以支护干预,形成深部高应力巷道围岩塑性区的可控扩展。

随着煤层开采深度的不断增加,大变形巷道也越发常见。该类巷道围岩的给定变形量和给定塑性区范围一般较大。这就要求支护结构一方面具有足够的锚固深度,从而确保锚固基础始终位于稳定岩体中;另一方面,还需要具有较强的延展性能,从而满足围岩的大变形特性。普通锚杆具有较好的延展性能,但其锚固深度一般较小,在塑性区范围较大的巷道中容

易失效。而普通锚索具有较高的承载能力且锚固深度较大,但其延伸率仅为 4% 左右,在大变形巷道中极易发生破断。此时,就需要一种既能适应围岩大变形、锚固深度大,又能持续提供高阻力的新型支护材料——大变形柔性锚索。大变形柔性锚索由 6 根钢绞线组成,具有受力和变形相匹配的特性。

普通锚索延伸率一般在 2%~4%,而大变形柔性锚索的延伸率超过了 10%,是普通锚索延伸率的 2.50~5.00 倍。直径 21.6 mm 的普通锚索可以累计承受 81 578.8 J 的冲击能,而 $\phi 21.5$ mm 抗冲击吸能锚索则可以累计承受 105 169.3 J 的能量,抗冲击性能是普通锚索的 1.25~2.00 倍^[88]。大变形柔性锚索的安装工艺与普通锚索相同,无需扩孔、安装恒阻器等额外工作,能极大地满足巷道围岩大变形和冲击地压等需求。

(4) 塑性区变化贯穿巷道服务全周期,采用过程控制,实现塑性区稳定控制。

煤矿巷道通常都具有一定的服务周期,在服务周期内围岩应力场、塑性区的形态和范围都是不断变化的。因此,不能将巷道围岩控制局限在巷道开挖时的一次支护措施,而要将其作为一个过程来对待。这就要求锚杆(索)不仅能适应支护施工时的围岩应力环境,还应适应巷道全周期内可能出现的应力扰动、围岩劣化等情况。

巷道开挖初期对围岩及时进行补偿支护能够影响巷道最终的围岩变形量和塑性区范围。文献^[89]发现,巷道初次支护方式不合理,支护强度不能满足实际需要,则会导致围岩的严重变形和破坏,需要对其进行返修。但是频繁的扩帮拉底,不仅会增加巷道支护成本,还会使巷道塑性区进一步扩展,不断增加支护难度。

此外,针对部分巷道在其服务期内可能出现的围岩应力环境改变,岩体力学参数劣化等情况,从而出现塑性区二次扩展的现象,这就需要在巷道开挖时或者环境改变之前,及时采取有效的加强支护措施,通过支护手段抑制塑性区的二次扩展,保障巷道安全稳定。

5.2 围岩塑性区的控制技术

巷道围岩塑性区的控制要具有全局性,根据塑性区的形成与扩展过程可将巷道围岩塑性区的控制划分为 3 个阶段。第 1 控制阶段为巷道开挖前,巷道位置、断面形状以及巷道走向都会影响开挖后所形成的“给定塑性区”的形态和范围,该阶段主要是控制围岩的“给定塑性区”。第 2 控制阶段是巷道开挖后到扰动应力等其他干扰因素影响前,在该阶段通常会实施

至少一次支护措施,主要是延缓围岩应力的卸载进程,控制“给定塑性区”的扩展。第3控制阶段是针对巷道在服务周期内可能出现的应力扰动 P_i ,在巷道应力

环境改变之前对围岩进行加强支护,从而控制巷道围岩塑性区的进一步扩展。图7为巷道围岩塑性区控制技术的整体思路。

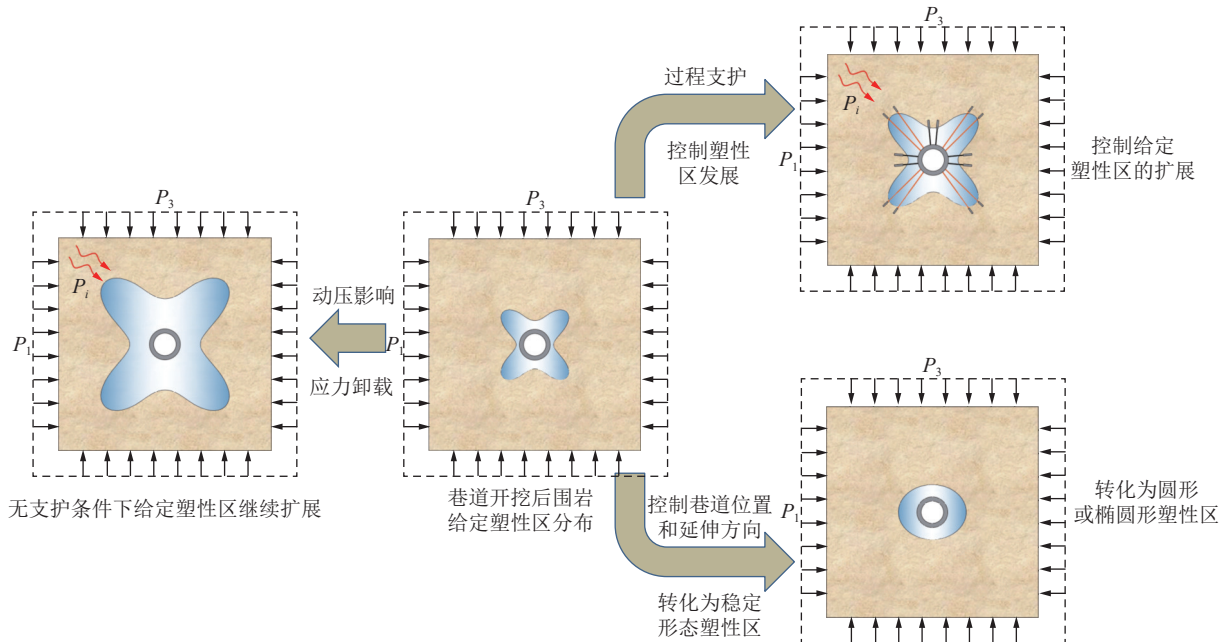


图7 巷道围岩塑性区控制技术

Fig.7 Control technology of plastic zone of surrounding rock of roadway

此外,为了能够更加清楚地反映巷道围岩塑性区的全局控制理念,笔者现将巷道围岩塑性区的控制技术作进一步阐述,如下:

(1) 开展巷道掘前地质、应力环境评估,为巷道选择“有利”的“给定塑性区”。

巷道围岩“给定塑性区”虽然不能完全消除,但却可以通过将巷道布置在地质条件较好、应力环境较为有利的位置,从而使巷道围岩“给定塑性区”呈稳定形态分布,减小“给定塑性区”的范围。换言之,将原本开挖后可能出现蝶形塑性区的巷道转变为出现圆形或椭圆形塑性区的巷道,或者,将原本开挖后可能出现大蝶形塑性区的巷道转变为出现小蝶形塑性区的巷道。

例如,将巷道布置在强度较高的硬岩当中,避开断层、溶洞等地质构造的影响,可以有效提高围岩的力学性能,减小“给定塑性区”的范围;根据地应力分布特征,尽可能选择对巷道较为有利的延伸方向,尤其针对井下服务周期较长的巷道,在实际条件允许的情况下,尽可能将巷道的侧压系数控制在1左右,避免让巷道处于较高侧压系数下,形成非稳定形态的蝶形塑性区。

(2) 科学确定巷道围岩塑性区的形态和范围。

现阶段,还无法在现场通过特定的仪器测量围岩

塑性区的精确范围,只能通过地质雷达、钻孔窥视等手段获得围岩松动圈的大致范围,并结合数值模拟,将松动范围测试结果与塑性区的数值模拟结果进行对比,从而确定巷道围岩塑性区的近似范围。具体过程如下:①通过现场试验,利用围岩取芯和地应力测试技术,获得岩体力学特征和巷道主应力大小和方向;利用岩心X射线衍射技术,获得围岩体矿物组成;②开展井下围岩钻孔窥视试验,获得巷道关键部位(顶板和两肩)围岩变形和破坏特征;③根据围岩力学参数和应力场信息建立数值模拟模型,数值计算并获得围岩塑性区范围;④对比分析现场试验和数值模拟的结果,确定巷道围岩塑性区的实际形态和范围。

(3) 根据塑性区形态及力学响应特性确定支护参数。

巷道位置选定以后,围岩给定塑性区的形态和范围也基本确定,但是可以通过支护对塑性区的控制作用,抑制塑性区的扩展。由于围岩塑性区具有稳定和非稳定2种形态,且它们除了在形态和范围上存在差异,力学响应也极为不同,因此,想要科学有效控制塑性区的扩展,需要根据塑性区的类型差异化设计巷道支护方式。不同形态的塑性区其力学响应的差异性主要体现在2个方面:①塑性区岩体本身力学状态的差异性,即非稳定形态的蝶形塑性区岩体的剪胀作用

往往较其他稳定形态的塑性区更强,尤其是在蝶形塑性区的蝶叶区域。② 塑性区岩体的稳定性存在差异。蝶形塑性区因对外力的高敏感性,其自身力学状态的保持能力较其他形态的塑性区弱,塑性区容易发生恶性扩展,塑性区内岩体力学状态也会随之动态改变。

当巷道近似处于双向等压状态或者围岩双向主应力的比值较小时,巷道塑性区的形态通常为圆形或椭圆形。此时,在不受外界强力干扰的情况下,巷道塑性区的形态通常发育较缓,只需要根据塑性区(破碎区)的范围确定锚杆(索)的支护参数即可。而当巷道处于双向极不等压环境时,围岩塑性区呈蝶形分布,塑性区范围大,塑性区恶性扩展的概率更高;处于高强剪胀状态下的塑性区岩体会向外挤压巷道浅部破碎岩体,致使巷道大变形失稳。因此,在设计该种巷道的支护方式时,不仅要考虑塑性区范围,采用差异支护方式,还要适当增加蝶叶处的锚杆(索)支护密度和强度,并在岩体破碎严重或偏应力极强时,采取薄弱区岩体注浆加固,提高岩体自身的力学强度。

6 工程应用

6.1 工程概况

湖南嘉禾煤矿 24 采区地质环境复杂,处于构造影响区域,煤层底板设有瓦斯抽采巷道,距上方煤层垂直距离 20~30 m,用于对即将回采的煤层进行提前瓦斯抽采,从而降低瓦斯事故的发生风险。底抽巷断面为直墙半圆拱形,采用全断面锚网喷支护。在瓦斯抽采期间,巷道局部围岩发生变形破坏,总体幅度并不大。但是,在工作面回采期间,位于工作面下方的区段底抽巷围岩变形破坏严重,如图 8 所示,出现了顶板下沉和片帮等现象,巷道断面大幅收缩,严重影响正常的生产活动。



图 8 巷道变形破坏状况
Fig.8 Failure state of the roadway

6.2 巷道应力环境与破坏特征分析

6.2.1 地应力测试

为了获取底抽巷围岩的应力信息,在底抽巷不受采动影响的区段开展了地应力测试。结果显示,底抽

巷近似沿中间主应力方向掘进,最大主应力近似垂直于巷道轴线,为 12.1 MPa,竖直应力为最小主应力,为 6.4 MPa,巷道侧压系数约为 1.89。

6.2.2 塑性区分布及巷道破坏成因分析

根据地应力测试结果,通过 FLAC^{3D} 建立巷道开挖模型,对非采动影响段的巷道破坏特征进行了模拟。模型左、右边界固定法向位移,底部采用固定约束。在模拟巷道开挖过程前,需要将模型初次平衡后岩体中已产生的位移和塑性区进行清除。围岩性质及力学模型如图 9 所示,数值模拟基本参数见表 1。

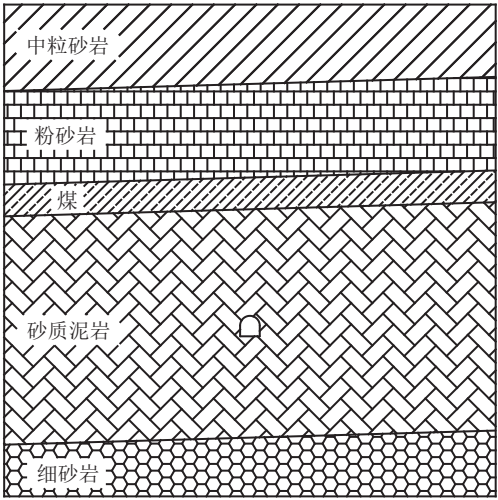


图 9 数值模拟模型
Fig.9 Numerical simulation model

表 1 数值模拟基本参数

Table 1 Basic parameters of the numerical simulation						
岩性	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	岩体密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
中粒砂岩	27.2	0.35	2.1	2 500	35	1.93
粉砂岩	11.5	0.31	1.5	2 350	31	1.55
煤	5.3	0.29	1.1	2 050	28	0.90
砂质泥岩	15.6	0.32	1.3	2 250	32	1.12
细砂岩	17.1	0.34	1.7	2 400	33	1.67

图 10 为底抽巷非采动影响段围岩在原始支护下的塑性区分布情况。结果显示,底抽巷开挖后,围岩塑性区在顶底板的延伸范围较帮部更广,且巷道肩角和底脚区域围岩塑性区最大半径略大于其他区域,有向蝶形塑性区发展的趋势。

考虑到巷道侧压系数较大,受采动影响后,围岩塑性区进一步扩展的风险极高,急需要通过有效的支护手段在采动影响之前进行干预。为了弄清巷道围岩的实际破坏范围,采用窥视仪对巷道顶板和肩角两个特殊方位的围岩体进行了窥视。图 11 为围岩钻孔窥视结果。

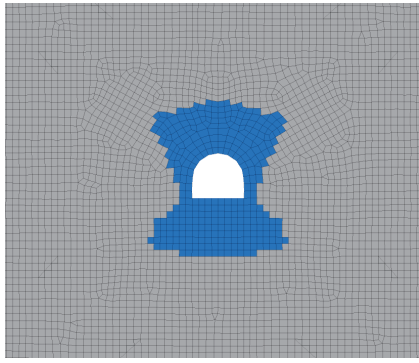


图 10 巷道围岩塑性区分布

Fig.10 Distribution of plastic zone of roadway

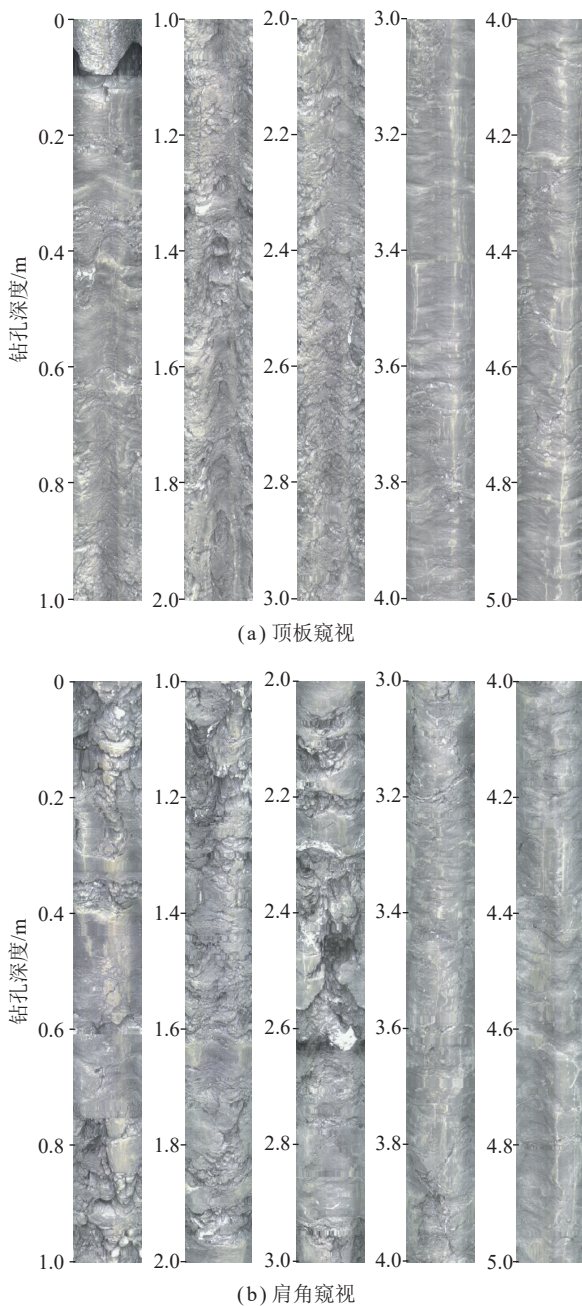


图 11 围岩钻孔窥视结果

Fig.11 Peeping results of surrounding rock drilling

从整体上来看,巷道肩部破碎区的分布范围较顶板更广,破坏程度更为严重。顶板破碎区深度约为 2.9 m,以杂乱分布的轴向和环向裂隙为主,严重破碎或塌孔的部位较少,围岩整体稳定性较好。然而,肩部破碎区深度较顶板略深,约为 3.2 m,孔内除了存在不同尺度的裂隙以外,孔壁脱落和塌孔现象也十分明显,围岩稳定性较差。

6.3 支护设计与效果分析

巷道原始支护以全断面布设螺纹钢锚杆为主,辅以“金属网+喷浆”技术,锚杆选取规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,200 \text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢普通锚杆,间排距为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,原始支护实施后未能取得较好的支护效果。考虑到巷道侧压系数较大,受采动影响后,围岩塑性区向蝶形形态发展的风险较高,根据围岩窥视结果,已经出现了巷道肩角区域岩体破坏深度较顶板深,破坏程度较顶板严重的现象,因此,需要对巷道肩角区域围岩进行重点加固。

6.3.1 具体支护参数

从抑制塑性区恶性扩展的角度出发,在底抽巷采取以“锚杆+锚索”差异化支护为主体,以“金属网+喷射混凝土”为辅助的综合控制技术方案。巷道帮部属于破坏的非严重区域,每帮布置规格为 $\phi 22 \text{ mm} \times 2\,200 \text{ mm}$ 的螺纹钢锚杆 3 根,锚固力不低于 70 kN。巷道底板和肩角区域为破坏的严重区域,尤其是肩角区域,在采动影响下塑性区有恶性扩展的趋势,布置规格为 $\phi 21.6 \text{ mm} \times 6\,300 \text{ mm}$ 的锚索,锚固力不低于 120 kN,其中顶板布置 1 根,每个肩角分别布置 2 根。此外,金属网采用 $\phi 6 \text{ mm}$ 钢筋焊接而成,网格 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,喷射混凝土厚度为 150 mm。图 12 为不同方案下巷道支护结构与围岩塑性区的分布关系。

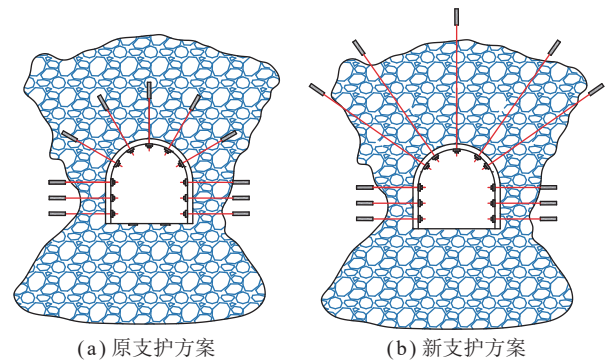


图 12 支护方案与塑性区分布间的关系

Fig.12 Relationship between the support scheme and the distribution range of the plastic zone

6.3.2 支护效果分析

选取未受采动影响的 100 m 巷道作为试验段,新

支护方案实施后,选择2个监测断面,对巷道在采动影响前后的围岩变形情况定期监测,图13为围岩监测数据。

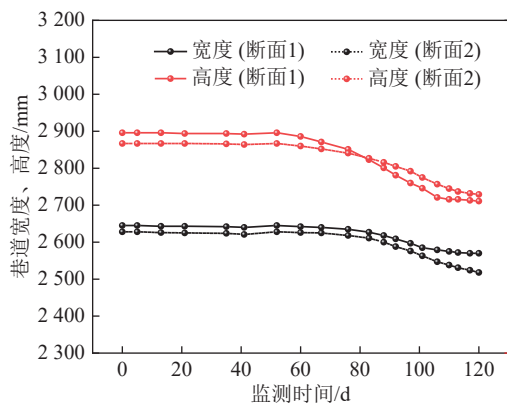


图13 巷道变形监测

Fig.13 Roadway deformation monitoring

图13的数据显示,新支护方案实施后,由于还未受到工作面回采影响,围岩变形量较小。随着工作面不断推进,巷道顶板和两帮变形量逐渐增加,巷道高度不断下降,在监测断面1处下降幅度最大,达到185 mm,2个监测断面处巷道宽度减少的幅度并不大,分别为75 mm和110 mm。新支护方案实施后,底抽巷围岩变形情况得到有效遏制,巷道断面收缩率明显降低,能够满足正常生产需要。

7 结 论

(1) 围岩塑性区是由应力环境决定的,塑性区的形态决定了巷道的破坏模式。

(2) 围岩塑性区扩展的时效特性以及锚杆支护对围岩塑性区的控制作用等,成为科学有效控制巷道围岩稳定的理论与技术依据。

(3) 对于深部巷道,巷道围岩塑性区的形成与扩展是必然的,要全面认识塑性区在巷道围岩中所起的作用,既要让围岩通过塑性破坏释放体内能量,又要防止因塑性区无序扩展导致的巷道破坏失稳。

(4) 将对围岩塑性区的控制划分为3个阶段:第1阶段控制围岩“给定塑性区”的形态和范围;第2阶段延缓围岩应力的卸载进程,控制“给定塑性区”的扩展;第3阶段控制由应力环境改变而导致的围岩塑性区的恶性扩展,从而实现巷道围岩的稳定控制。

参考文献(References):

[1] 马念杰,赵希栋,赵志强,等.深部采动巷道顶板稳定性分析与控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2287-2295.
MA Nianjie, ZHAO Xidong, ZHAO Zhiqiang, et al. Stability analysis and control technology of mine roadway roof in deep mining[J].

Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2287-2295.
[2] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等.大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制[J].煤炭学报,2016,41(12):2932-2939.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2932-2939.
[3] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等.深部开采中巷道底鼓问题的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(14):2396-2401.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2396-2401.
[4] 赵洪宝,程辉,吉东亮,等.近距离煤层回采巷道非对称性破坏机理与演化规律研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(6):1029-1040.
ZHAO Hongbao, CHENG Hui, JI Dongliang, et al. Study of the mechanism and evolution law of unsymmetrical failure of the mining roadway in close distance coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1029-1040.
[5] 潘俊峰,闫耀东,马小辉,等.考虑时变特性的煤层大巷群冲击地压机理及防治[J].煤炭学报,2022,47(9):3384-3395.
PAN Junfeng, YAN Yaodong, MA Xiaohui, et al. Mechanism and prevention of rock burst in coal seam roadway group considering time-varying characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3384-3395.
[6] 于学馥,乔端.轴变论和围岩稳定轴比三规律[J].有色金属,1981,33(3):8-15.
YU Xuefu, QIAO Duan. Theory of axial variation and three rules of axial ratio for stabilizing country rock[J]. Nonferrous Metals, 1981, 33(3): 8-15.
[7] 王襄禹,柏建彪,李伟.高应力软岩巷道全断面松动卸压技术研究[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):37-40.
WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, LI Wei. Stress-relief technique of full-face gangue dropping in soft rock roadway under high stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 37-40.
[8] 王悦汉,陆士良,李洪运.顶部卸压法维护软岩硐室[J].矿山压力与顶板管理,1992(2):4-8.
WANG Yuehan, LU Shiliang, LI Hongyun. Top pressure relief method to maintain soft rock chamber[J]. Mine Pressure and Roof Management, 1992(2): 4-8.
[9] GALE W J. Strata control utilising rock reinforcement techniques and stress control methods in Australian coal mines[J]. Mining Engineer, 1991, 352(150): 247-253.
[10] 钱鸣高.采场上覆岩层岩体结构模型及其应用[J].中国矿业学院学报,1982(2):6-16.
QIAN Minggao. A structural model of overlying strata in longwall workings and its application[J]. Journal of China Institute of Mining Technology, 1982(2): 6-16.
[11] 宋振骐,宋扬,刘义学,等.关于采场支撑压力的显现规律及其应用[J].山东矿业学院学报,1982(1):1-25.
SONG Zhenqi, SONG Yang, LIU Yixue, et al. Behavior regularity of abutment pressure in stope and its application[J]. Journal of Shandong Institute of Science and Technology, 1982(1): 1-25.
[12] 何满潮,陈上元,郭志彪,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及

- 其工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 959–969.
- HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 959–969.
- [13] 马新根, 何满潮, 李钊, 等. 复合顶板无煤柱自成巷切顶爆破设计关键参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 236–246.
- MA Xingen, HE Manchao, LI Zhao, et al. Key parameters of gob-side entry retaining automatically formed by roof cutting and blasting in compound roof condition[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(2): 236–246.
- [14] 左建平, 洪紫杰, 于美鲁, 等. 破碎围岩梯度支护模型及分级控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 221–231.
- ZUO Jianping, HONG Zijie, YU Meilu, et al. Research on gradient support model and classification control of broken surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 221–231.
- [15] 左建平, 魏旭, 王军, 等. 深部巷道围岩梯度破坏机理及模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 478–485.
- ZUO Jianping, WEI Xu, WANG Jun, et al. Investigation of failure mechanism and model for rocks in deep roadway understress gradient effect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 478–485.
- [16] 肖同强. 深部构造应力作用下厚煤层巷道围岩稳定与控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- XIAO Tongqiang. Study on surrounding rock stability and control of deep roadway in thick coal seam under the action of tectonic stress[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [17] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861–1874.
- QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861–1874.
- [18] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程地质力学研究进展[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 46–62.
- HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Research progress of soft rock engineering geomechanics in China Coal Mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1): 46–62.
- [19] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342–345.
- HOU Chaojiong, GOU Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342–345.
- [20] 侯朝炯, 郭励生, 勾攀峰. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [21] 李军. 弱胶结软岩流变特性及巷道支护技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- LI Jun. Research on rheological properties of weak cemented soft rock and roadway support technology[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [22] 李桂臣. 软弱夹层顶板巷道围岩稳定与安全控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- LI Guichen. Study on the surrounding rock stability and safety control of roadways roof embedded weak intercalated seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [23] 李桂臣, 杨森, 孙元田, 等. 复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 29–45.
- LI Guichen, YANG Sen, SUN Yuan Tian, et al. Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 29–45.
- [24] 孟庆彬. 极弱胶结岩体结构与力学特性及本构模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- MENG Qingbin. Study on structure and mechanical properties and constitutive model of very weakly cemented rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [25] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943: 37–42.
- [26] 徐艺纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [27] 方祖烈. 拉压域特征及主次承载区的维护理论[C]. //世纪之交软岩工程技术现状与展望. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 48–51.
- [28] 康红普. 巷道围岩的承载圈分析[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 84–89.
- KANG Hongpu. Analysis of bearing ring of roadway surrounding rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(4): 84–89.
- [29] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践, 1997(1): 35–37.
- KANG Hongpu. Key circle theory of roadway surrounding rock[J]. Mechanics and Practice, 1997(1): 35–37.
- [30] 李树清. 深部煤巷围岩控制内、外承载结构耦合稳定原理的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- LI Shuqing. Study on principal of inner-outer bearing structures coupling stabilization for strata control around deep coal drifts[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [31] 王卫军, 李树清, 欧阳广斌. 深井煤层巷道围岩控制技术及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2102–2107.
- WANG Weijun, LI Shuqing, OUYANG Guangbin. Study on technique and test of surrounding rock control of deep shaft coal roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2102–2107.
- [32] 李新元, 陈培华. 浅埋深极松软顶板采场矿压显现规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3305–3309.
- LI Xinyuan, CHEN Peihua. Study on regularity of structural behaviours around coal face under the shallow-buried loose roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3305–3309.
- [33] 梁晓丹, 赵坚, 宋宏伟. 围岩自调节成拱特性的实验与数值分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 96–102.
- LIANG Xiaodan, ZHAO Jian, SONG Hongwei. Experimental and numerical analysis on the arching action from stress adjusting in surrounding rocks[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(1): 96–102.
- [34] 王迎超, 严细水, 靖洪文, 等. 深埋圆形隧道的压力拱研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 910–915.
- WANG Yingchao, YAN Xishui, JING Hongwen, et al. Study on pressure-arch of deep circular tunnel[J]. Chinese Journal of Under-

- ground Space and Engineering, 2012, 8(5): 910–915.
- [35] 杜晓丽, 马芹永, 宋宏伟, 等. 煤矿层状岩体压力拱演化规律的相似模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 381–386.
DU Xiaoli, MA Qinyong, SONG Hongwei, et al. Simulation on evolution characteristics of the pressure arch in bedded rock at coal mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 381–386.
- [36] 王晓卿, 康红普, 高富强, 等. 碎石锚固中压力拱形成与锚杆作用分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3139–3147.
WANG Xiaqing, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Analysis of pressure arch formation and rockbolt function in gravel bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3139–3147.
- [37] 黄庆享, 郑超. 巷道支护的自稳平衡圈理论[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1231–1236.
HUANG Qingxiang, ZHENG Chao. Theory of self-stable ring in roadway support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1231–1236.
- [38] 谢生荣, 谢国强, 何尚森, 等. 深部软岩巷道锚喷注浆强化承压拱支护机理及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 404–409.
XIE Shengrong, XIE Guoqiang, HE Shangsen, et al. Anchor-spray-injection strengthened bearing arch supporting mechanism of deep soft rock roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 404–409.
- [39] 杨军辉, 蒋再胜, 谢生荣. 深部大断面巷道交叉点围岩稳定性分析及控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 49–56.
YANG Junhui, JIANG Zaisheng, XIE Shengrong. Stability analysis and control technology of surrounding rocks at deep large cross-section roadway[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 49–56.
- [40] 彭瑞. 深部巷道耦合支承压力学分析及分层支护控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
PENG Rui. Mechanical analysis of compound bearing layer and research on multi-echelon support in deep roadway[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [41] 彭瑞, 欧阳振华, 朱建明, 等. 巷道开挖面抗剪承载结构形成和蠕变规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 493–501.
PENG Rui, OUYANG Zhenhua, ZHU Jianming, et al. Formation and creep characteristic of shear bearing structure in soft roadway after excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 493–501.
- [42] 姜鹏飞. 千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制原理及技术[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
JIANG Pengfei. Roadway strata control principle and techniques by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [43] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 845–864.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 845–864.
- [44] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535–543.
YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535–543.
- [45] 牛双建, 靖洪文, 张忠宇, 等. 深部软岩巷道围岩稳定控制技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 914–919.
NIU Shuangjian, JING Hongwen, ZHANG Zhongyu, et al. Study on control technology of surrounding rocks in deep soft roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 914–919.
- [46] 杨仁树, 薛华俊, 郭东明, 等. 复杂岩层大断面硐室群围岩破坏机理及控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2234–2242.
YANG Renshu, XUE Huajun, GUO Dongming, et al. Failure mechanism of surrounding rock of large section chambers in complex rock formations and its control[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2234–2242.
- [47] 王猛. 煤矿深部开采巷道围岩变形破坏特征试验研究及其控制技术[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
WANG Meng. Experiment study on characteristic of deformation and failure of roadway's surrounding rock and its controlling technique in deep mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2010.
- [48] KASTNER H. 隧道与坑道静力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 35–38.
- [49] 唐芙蓉, 王连国, 张华磊, 等. 动压软岩巷道破坏机理及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 537–542.
TANG Furong, WANG Lianguo, ZHANG Hualei, et al. Failure mechanism of dynamically-pressured soft rock roadway and control technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 537–542.
- [50] 赵志强. 大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
ZHAO Zhiqiang. Mechanism of surrounding rock deformation and failure and control method research in large deformation mining roadway[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [51] 王卫军, 韩森, 董恩远. 考虑支护作用的巷道围岩塑性区边界方程及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 749–755.
WANG Weijun, HAN Sen, DONG Enyuan. Boundary equation of plastic zone in roadway surrounding rocks considering supporting effect and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 749–755.
- [52] 李涛, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 考虑中间主应力的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 68–71.
LI Tao, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, et al. Analysis on Plastic zone in surround rock of mine circular type gateway in non-uniform stress field with centre main stress considered[J]. Coal Engineering, 2014, 46(3): 68–71.
- [53] 彭瑞, 赵光明, 孟祥瑞. 基于 D-P 准则的非均匀应力场受扰动轴对称巷道安全性分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 103–108.
PENG Rui, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Analysis of safety of disturbed and axisymmetric roadway under non-uniform stress field based on D-P criterion[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(1): 103–108.

- [54] 陈立伟, 彭建兵, 范文, 等. 基于统一强度理论的非均匀应力场圆形巷道围岩塑性区分析[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 20–23.
CHEN Liwei, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Analysis of surrounding rock mass plastic zone of round tunnel under non-uniform stress field based on the unified strength theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 20–23.
- [55] 刘波, 刘璐璐, 张功, 等. 非等压下考虑渗流和剪胀的圆巷围岩弹塑性统一解[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(5): 151–157.
LIU Bo, LIU Lulu, ZHANG Gong, et al. Elastic-plastic unified solution to circular tunnel under 2-D unequal pressure considering seepage and dilatancy[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(5): 151–157.
- [56] 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 基于岩石非线性统一强度准则的非均匀应力场中圆形巷道围岩塑性区分析[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(3): 202–206.
ZHANG Xiaobo, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Plastic zone analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel under non-uniform stress field[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(3): 202–206.
- [57] 鲁宾涅依特 KB. 矿山岩石力学的几个问题[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1960: 155–162.
- [58] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 323–326.
- [59] 陈启美. 坑道围岩弹塑性应力的小参数解法[J]. *煤炭学报*, 1964(4): 61–67.
CHEN Qimei. Method of distribution applying to the elasto-plastic stress analysis of mine entries[J]. *Journal of China Coal Society*, 1964(4): 61–67.
- [60] 侯公羽, 李晶晶, 赵伟伟, 等. 两向不等压圆形巷道弹塑性摄动解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 3639–3647.
HOU Gongyu, LI Jingjing, ZHAO Weiwei, et al. Perturbation solutions for elasto-plastic problems of circular tunnel under unequal compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3639–3647.
- [61] 魏悦广. 用摄动法计算椭圆形巷道的弹塑性问题[J]. *工程力学*, 1990, 7(2): 93–102.
WEI Yueguang. Calculating elasto-plastic problem of elliptical tunnel with perturbation methods[J]. *Engineering Mechanics*, 1990, 7(2): 93–102.
- [62] GALIN L A. Plane elastic-plastic problem: Plastic regions around circular holes in plates and beams[J]. *Prikl Mat Mekh*, 1946(10): 365–386.
- [63] OCHENSBERGER W, CELIGOJ C C, ULZ M H. Amendment to the galin plane elastoplastic solution[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(11): 1658–1662.
- [64] DETOURNAY E, FAIRHURST C. Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under nonhydrostatic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1987, 24(4): 197–211.
- [65] 吕爱钟, 张晓莉, 王少杰. 两向不等压圆形隧洞弹塑性解析分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 14–22.
LÜ Aizhong, ZHANG Xiaoli, WANG Shaojie. Analytic method for elasto-plastic analysis of circular tunnels under non-axisymmetric stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 14–22.
- [66] 董海龙. 非均匀应力场巷道围岩分区模型及塑性区解析研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
DONG Hailong. Study on zoning model and plastic zone analysis of roadway surrounding rock under non-uniform stress field[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2019.
- [67] 李军, 马念杰, 王卫军, 等. 蝶形破坏理论及其研究进展[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(2): 209–228.
LI Jun, MA Nianjie, WANG Weijun, et al. Review on research of butterfly failure theory and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(2): 209–228.
- [68] 郭晓菲. 巷道围岩塑性区形态判定准则及其应用[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
GUO Xiaofei. Criterion of plastic zone shapes of roadway surrounding rock and its application[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2019.
- [69] 郭晓菲, 郭林峰, 李臣, 等. 基于塑性区形态系数的巷道冲击风险性量化评估方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(1): 39–49, 78.
GUO Xiaofei, GUO Linfeng, LI Chen, et al. A quantitative assessment method of roadway rockburst risk based on the plastic zone shape coefficient[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(1): 39–49, 78.
- [70] 李季. 深部窄煤柱巷道非均匀变形破坏机理及冒顶控制[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
LI Ji. The non-uniform deformation failure mechanism and roof control of narrow coal pillar roadway in depth[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2016.
- [71] 赵志强, 马念杰, 刘洪涛, 等. 巷道蝶形破坏理论及其前景[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 969–978.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 969–978.
- [72] 赵希栋. 掘进巷道蝶型煤与瓦斯突出启动的力学机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
ZHAO Xidong. Research on mechanical system of the start of butterfly shape coal and gas outburst in excavation roadway[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2017.
- [73] 镐振. 义马煤田回采巷道塑性区演化规律与冲击破坏机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
HAO Zhen. Evolution law of plastic zone and burst failure mechanism of gateway in yima coalfield[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2018.
- [74] 马念杰, 郭晓菲, 赵志强, 等. 均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(11): 2679–2688.
MA Nianjie, GUO Xiaofei, ZHAO Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2679–2688.
- [75] 袁超. 深部巷道围岩变形破坏机理与稳定性控制原理研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
YUAN Chao. Research on the mechanism and stability control of rock deformation and failure around deep tunnels[D]. Xiangtan:

- Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [76] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的时间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 5–27.
- KANG Hongpu. Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 5–27.
- [77] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1–30.
- KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1–30.
- [78] 王卫军, 董恩远, 赵志伟, 等. 预裂锚固体力学特性及锚固机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 82–89.
- WANG Weijun, DONG Enyuan, ZHAO Zhiwei, et al. Experimental study on mechanical properties of anchorage body and on anchorage mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 82–89.
- [79] 王卫军, 韩森, 董恩远, 等. 岩块锚固机理的模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 177–184.
- WANG Weijun, HAN Sen, DONG Enyuan, et al. Simulation on anchorage mechanism of rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 177–184.
- [80] 辛亚军, 勾攀峰. 锚固岩体蠕变特性的物理模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3613–3624.
- XIN Yajun, GOU Panfeng. Study on physical simulation experiment for anchorage rock creep characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3613–3624.
- [81] HE Manchao, SUI Qiru, LI Mengnan, et al. Compensation excavation method control for large deformation disaster of mountain soft rock tunnel[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 951–963.
- [82] HE Manchao, WANG Qi. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106784.
- [83] 郭志彪, 李伟涛, 何满潮, 等. 基于补偿理论的深部软岩动压巷道破坏机理及控制对策[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 931–942.
- GUO Zhibiao, LI Weitao, HE Manchao, et al. Failure mechanisms and control strategies in dynamic pressure roadways of deep soft rock based on compensation theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 931–942.
- [84] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071–1081.
- KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071–1081.
- [85] 曹俊才. 煤矿巷道预应力锚杆时效支护理论研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- CAO Juncai. Theoretical study on time-dependent support of prestressed anchor in coal mine roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [86] 李英明, 张瀚, 孟祥瑞. 软岩巷道二次支护时机研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 47–52.
- LI Yingming, ZHANG Han, MENG Xiangrui. Research on secondary support time of soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 47–52.
- [87] 刘学生, 武允昊, 谭云亮, 等. 深部高水平应力巷道倾斜锚杆破坏机制及加强支护时机[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 609–622.
- LIU Xuesheng, WU Yunhao, TAN Yunliang, et al. Breaking mechanism of inclined bolts in deep mine roadway with high horizontal stress and the timing of strengthening support[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 609–622.
- [88] 马念杰, 马海燕, 王银伟, 等. 深部大变形巷道支护原理与柔性锚索支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 957–964.
- MA Nianjie, MA Haiyan, WANG Yinwei, et al. Support principle and flexible cable support technology of deep large deformation roadway[J]. Journal of Mining Safety Engineering, 2023, 40(5): 957–964.
- [89] 王卫军, 范磊, 马谕杰, 等. 基于蝶形破坏理论的深部巷道围岩控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 157–167.
- WANG Weijun, FAN Lei, MA Yujie, et al. Research on surrounding rock control technology of deep roadway based on butterfly failure theory[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 157–167.